

设备热平衡

孙家庆 王 权 刘正武 刘聿拯



上海機械學院

TK1
3
3

前 言

能源问题是我国四化建设的首要问题。为了解决好能源问题，必需掌握能源的利用情况，就要开展热平衡工作。因为它对于加强能源的科学管理、提高能源利用率、进行企业改造、开展综合节能技术的研究、制订长期规划、改革工业结构等等均有重要意义。因此，考虑到四化建设以及我院热能转换工程专业的教学需要，在我们参加上海市、区、局所主办的热平衡培训工作的基础上，对我们原用讲稿进行了适当的修改和补充，而汇编成这本《设备热平衡》一书。本书可供有关热能工程技术人员、大学生以及热工技术干部，特别是对在热能管理技术干部的培训学习作参考之用。

对于内容的取舍，主要从当前热平衡工作的需要出发，着重于热平衡基本概念和计算方法，特别是在有效热、各项热损失及效率的概念上，编者为了求得科学合理，作了些努力。同时，为了便于自学和了解有关基本理论的所以然，适当地选编一些必要的热工基础知识。为熟练计算方法，各章均有大小例题并有附录提供必要的资料。

本书是在陈之航教授的指导下，由孙家庆编写第一章、第五章、第六章、第九章，王权编写第二章、第十章、第十一章、第十二章，刘正武编写第三章、第七章、第八章，刘聿拯编写第四章。全书由孙家庆、王权担任统校。上海机械学院情报室徐铮和张小白同志对本书进行了认真细致的校对和辛勤的工作。在此表示衷心的感谢。

由于我们业务水平有限，书中肯定会存在一些问题，诚恳地希望读者予以批评指正，以便我们做进一步的修改和补充。

编者 一九八〇年十一月



A833922

目 录

第一章 引言.....(1)

- 1—1 概述
- 1—2 热平衡基本概念
- 1—3 因次和单位

第二章 热力学基础.....(7)

- 2—1 热力系统
- 2—2 工质的基本状态参数
- 2—3 气体的状态方程
- 2—4 混合气体的性质
- 2—5 气体的比热及热量计算
- 2—6 热力学基本定律
- 2—7 水蒸汽
- 2—8 湿空气

第三章 传热学基础.....(37)

- 3—1 导热
- 3—2 对流放热
- 3—3 综合传热
- 3—4 辐射换热

第四章 燃料及燃烧产物的计算.....(51)

- 4—1 燃料的分类及组成成分
- 4—2 燃料的发热量
- 4—3 理论空气量及过量空气系数
- 4—4 烟气量的计算
- 4—5 气体燃料的燃烧产物计算
- 4—6 燃烧产物的焓的计算
- 4—7 烟气分析
- 4—8 烟气分析结果的应用
- 例题

第五章 热平衡基本计算.....(64)

- 5—1 概述
- 5—2 热量计算的一般方法
- 5—3 热平衡方程式及热效率
- 5—4 能量转换效率
- 5—5 燃烧效率
- 5—6 热利用率

第六章 锅炉热平衡.....(78)

- 6—1 概述
 - 6—2 锅炉的输入热
 - 6—3 锅炉的热效率
 - 6—4 排烟热损失
 - 6—5 化学未完全燃烧热损失
 - 6—6 机械未完全燃烧热损失
 - 6—7 散热损失
 - 6—8 灰渣物理热损失
 - 6—9 锅炉机组总有效吸热量
 - 6—10 锅炉机组热平衡及燃料消耗量的计算
- 例题

第七章 供热管道.....(95)

- 7—1 概述
 - 7—2 管道的保温
 - 7—3 供热管道散热损失的确定方法
 - 7—4 供热管道的漏失和冷凝损失
- 例题

第八章 玻璃窑炉.....(103)

- 8—1 玻璃窑炉热平衡的建立
- 8—2 各项输入热的计算
- 8—3 各项输出热的计算
- 8—4 体系内部循环热量
- 8—5 热平衡表和热流图的绘制

第九章 冶金加热炉.....(124)

- 9—1 概述
- 9—2 热平衡方程及热效率

9—3 热平衡计算

例题

第十章 蒸发设备.....(140)

10—1 概述

10—2 蒸发设备的热平衡计算

10—3 提高加热蒸汽经济性的措施

第十一章 干燥设备.....(152)

11—1 概述

11—2 圆筒式干燥机的热平衡计算

例题

第十二章 蒸馏设备.....(163)

12—1 概述

12—2 精馏原理

12—3 连续精馏设备的流程

12—4 精馏设备的热平衡计算

例题

附 录

附录1 国际单位制 (SI) 及其换算

附录2 水的比容和焓

附录3 水蒸汽表

(a) 饱和水与干饱和蒸汽表 (按温度排列)

(b) 饱和水与干饱和蒸汽表 (按压力排列)

(c) 未饱和水与过热蒸汽表

附录4 常用气体的比热

(a) 气体的平均定压容积比热表

(b) 气体的平均定压重量比热表

(c) 气体的平均定压摩尔比热表

附录5 1米³空气和1公斤灰的焓

附录6 可燃气体的平均比热

附录7 空气和烟气的平均比热

附录8 空气的热性质

附录9 常用材料的表面黑度

附录10 几种金属的热性质

附录11 保温、建筑、绝缘材料的密度和导热系数

附录12 几种保温耐火材料导热系数与温度的关系

附录13 各种钢的比热

(a) 各种钢在20~100℃的平均比热的概略数值

(b) 碳素钢的平均比热

(c) 合金钢的平均比热

附录14 $C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$ 的计算值

附图 I 炉墙散热损失

附图 II 湿空气I—d图

附图 III 液体比热共线图

第一章 引言

1—1 概 述

能源问题是同整个国家经济建设攸关的大事。特别是处在能源利用率很低，全国平均仅为百分之二十八的情况下，显得特别突出。世界上比较先进的国家已达百分之五十七。目前，能源在我国已是工农业生产中的薄弱环节。

提高能源利用率的关键是节能技术的研究，它将起着决定性的作用。重要问题在于：设备热效率太低，成套装置利用率太低，整个企业的利用率太低。研究提高设备热效率及节能，研究提高企业的能源利用率及节能，这就是当前迫切的任务。特别是对整个企业能源利用最佳系统的研究，有着极其重要的意义。

要提高能源利用率，就必须了解能源利用情况。要了解情况，就必须作设备的热平衡，作企业的热平衡，作整个国家的热平衡。热平衡是指(设备、企业、国家)热能的收支平衡。热平衡工作的目的：

1. 可以鉴定设备的热力工作特性，是否达到设计时所预定的热力工况(各项指标)，以评价工作的好坏；
2. 可以测算设备热效率、企业能源利用率的大小，评价能源(热能)有效利用的程度；
3. 可以测算各项热(能)损失的大小，提供研究节能技术的方向及提高热效率的途径；
4. 可以对整个企业的改造、提高能源利用率以及研究企业能源利用最佳系统提供数量的依据；
5. 给生产中确定各项能耗指标，提供依据。

可见，热平衡工作的重要性和必要性，如同一面镜子，使人们可以清楚地看到能源的利用情况。对于加强能源的科学管理，提高能源的利用率，进行企业的改造，开展综合节能技术的研究、制订长期规划，改革工业结构等等均有重要意义。

一般的热平衡工作应包括下列主要内容：

1. 首先明确热平衡工作的对象。它包括以那些耗能大、效率低的重点企业及重点设备开展工作的计划，也包括要研究的对象(企业或设备)的确定范围。
 2. 制订工作大纲。在选好研究的对象之后，用大纲明确任务(目的意义)；确定方法(试验方案、测试技术计算方法等)；安排组织计划等。
 3. 进行热平衡试验。注意测试仪表的安装及仪表规格是否符合要求；按规定进行试验与记录数据。
 4. 热平衡计算。根据试验测得数据，按选定的计算方法进行计算。从试验所得的数据资料，变成试验任务(热平衡目的)所要求的结果，必须有正确的计算方法来完成。
- 因此，计算方法本身必须是：理论基础可靠；概念定义确切；要求的测试方法简单可靠。
5. 测算结果的综合及分析。根据热平衡之目的提出报告。

热平衡工作就其对象和范围的不同，可分有设备热平衡与企业热平衡。设备热平衡是企

业热平衡的基础。本书主要讲述设备热平衡。工业上（冶金、化工、轻纺、机电、动力等）热能利用设备种类繁多，而且用热设备中，可以发生各种各样的热力过程，如加热、冷却、蒸发、沸腾、凝结、熔化、凝固、氧化之类，也可以发生比较复杂的综合性过程，例如蒸馏和干馏。这就构成了热平衡计算方法的复杂性，要想得到一个统一完整的计算方法，是一个极其困难的任务，起码在目前是办不到的。

因此，本书是以典型设备讲述基本原理及方法，力求统一。注意搞清基本理论与概念，着重具体问题的合理分析，正确处理。

1—2 热平衡基本概念

在实际工程中，各种工艺设备随着生产过程的进行，都一定伴随着发生各种各样形式能量的转换过程。在能量转换过程中必须遵循能量守恒定律，也必将遵守热力学第二定律。任何一种形式的能量不可能全部转换成另一种形式，而必有一定损失存在，其转换效率只能最大的接近于1，且不可能等于1。

对一台热能利用设备（或企业），在分析它的用能变化时，以能量守恒的观点，必存在：

$$\text{输入总能量（包括耗电等）} = \text{输出有效（有用）能} + \text{损失} \quad (1-1)$$

或者：

$$\text{输入总热量（只算热能）} = \text{输出有效（有用）热} + \text{损失} \quad (1-2)$$

这就是热平衡关系式，实际上是能量守恒关系式。对一切要研究的对象，不论是热能利用设备，还是用能企业，均以此为基础列出它的热（能量）平衡方程。如本书中所讲的热能利用设备，就可以更具体的用下式表示其热平衡关系

$$Q_{ws} + Q_{ns} - Q_{fj} = Q_{yx} + Q_{xr} + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1-3)$$

式中

Q_{ws} ——设备外输入热之和；

Q_{ns} ——设备内部生成热；

Q_{fj} ——燃料燃烧分解吸热；

Q_{yx} ——有效利用热；

Q_{xr} ——有化学反应吸热；

$\sum_{i=1}^n Q_i$ ——各项热损失之总和。

在建立热平衡式时必须注意：

1. 研究对象的范围；
2. 遵守能量守恒；
3. 因次单位统一；
4. 基准温度一致。

设备的热平衡，其热量的平衡关系，除用热平衡式表示外，还可用热平衡表和热流图（热平衡图）来表示。热平衡表是以表格的形式表示出各种输入、输出，损失等热量的大小。热流图是用图形按比例表示各种热量的大小及方向（输入或输出）。

输入、输出设备的各种热量，大致可划分为：

四、试验数据综合表

序号	标准 序号	名 称	符号	单位
(一) 燃料特性				
1	1	燃料应用基元素碳	C^y	%
2	2	—— " —— 氢	H^y	"
3	3	—— " —— 氧	O^y	"
4	4	—— " —— 硫	S^y	"
5	5	—— " —— 氮	N^y	"
6	6	燃料应用基灰份	A^y	"
7	7	燃料应用基水份	W^y	"
8	8	煤可燃基挥发物	V^r	%
9	9	煤的应用基低发热值	Q_{dw}^y	kcal/kg
(二) 锅炉正平衡热效率				
10	35	蒸发量 (实测)	D	kg/h
11	36	给水流量	D_{gs}	kg/h
12	38	蒸汽压力	P	kg/cm ²
13	40	饱和蒸汽热焓	i_{bg}	kcal/kg
14	43	汽化潜热焓	r	kcal/kg
15	44	蒸汽湿度	W	%
16	45	给水温度	t_{gs}	℃
17	46	给水焓	i_{gs}	kcal/kg
18	53	燃料耗量	B	kg/h
19	57	输入热量	Q_r	kcal/kg
20	58	锅炉正平衡效率	η_z	%
(三) 锅炉反平衡热效率				
21	59	炉渣淋水后含水量	W_{lz}	%
22	60	炉渣重量(对湿渣应扣除水份 w_{lz})	G_{lz}	kg/h
23	61	漏煤重量	G_{lm}	%
24	65	炉渣含碳量	C_{lz}	%
25	67	漏煤含碳量	C_{lm}	%
26	70	炉渣纯灰占燃料灰百分比	a_{lz}	"

热、给水热等)，称为输入总热能。此时，输出有效热能与输入总热能之比，称为热能转换效率。即有：

$$\text{热能转换效率} = \frac{\text{输出有效能}}{\text{输入总热能}} \times 100\% \quad (1-6)$$

例如，一台工业锅炉，它的输入总热能 Q_0 ，应包括：燃料燃烧热；空气拥有热（外部加热）；燃料物理显热；给水热等，则：

$$Q_0 = BQ_{dw}^y + Q_k + i_r + Q_{gs} \quad (1-7)$$

式中 B ——燃料消耗量 kg/h ；
 Q_{dw}^y ——燃料低位发热量 kcal/kg ；
 Q_k ——空气拥有热 kcal/h ；
 i_r ——燃料物理显热 kcal/h ；
 Q_{gs} ——给水拥有热 kcal/h 。

它的输出有效能应为

$$Q_0' = Di'' \quad \text{kcal/h} \quad (1-8)$$

式中 D ——蒸发量（供汽量） kg/h ；
 i'' ——蒸汽热焓 kcal/kg 。

$$\text{所以} \quad \eta_{rz} = \frac{Di''}{Q_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

热能利用率，其定义：已利用热与总输入热之百分比。

$$\text{热能利用率(热利用系数)} = \frac{\text{有效利用热} + \text{回收废(余)热} + \text{重复利用热}}{\text{总输入热}} \quad (1-10)$$

它将随着有效利用热、已回收废（余）热、重复利用热等的增大而提高。所以，热能利用率有可能大于百分之百（大于1）。

燃烧效率，是指燃料是否得到完全燃烧。因有化学和机械未完全燃烧损失的存在，而使效率小于100%。故燃烧效率可表示为：

$$\eta_r = 100 - (q_3 + q_4) \% \quad (1-11)$$

式中 q_3 ——化学未完全燃烧热损失 $\%$ ；
 q_4 ——机械未完全燃烧热损失 $\%$ 。

1-3 因次和单位

研究设备热平衡，其实就是研究设备的热（能）交换的物理过程，它将根据能量守恒的原则，用所涉及到的物理量以物理方程（热平衡方程）的形式在其量上表达热（能）平衡的关系。

物理量是用因次（时间、重量、能量）与单位（小时、公斤、千卡）来度量的。物理量必须在给出相应的单位，同时给出含有这一单位的数目，该物理量才算是已知的。因此，物

理方程（热平衡方程）中代表每个物理量的符号必是一个数与一个单位的乘积（如 $Q = 25$ 千卡）。

因次和单位是两个不同的概念，必须注意加以区别。一个物理量只有一种因次，但它却可用不同的单位表示。例如：

时间因次，可用小时(h)、秒(s)来表示，

$$1 \text{ 小时(h)} = 3600 \text{ 秒(s)};$$

重量因次，可用公斤(kg)、克(g)表示，

$$1 \text{ 公斤(kg)} = 1000 \text{ 克(g)};$$

能(热)量因次，可用焦耳、千卡表示，

$$1 \text{ 千焦耳(KJ)} = 1000 \text{ 焦耳(J)} = 0.23844 \text{ 千卡(kcal)}。$$

因次间绝不能换算，如时间不能换算成能量。同一因次的不同单位是可以换算的（如：小时、分、秒之间）。

单位中又分基本单位（℃、秒、千卡）和导出单位。导出单位是由基本单位组成，如：米/秒、千卡/小时、千卡/米²·℃。

基本单位是人为规定的，当然希望越少越好。我国目前在工程实用上是采用工程单位制。通常，工程单位制是这样规定的：基本单位用长度因次（米）、力因次（公斤力）、时间（秒）和温度因次（℃）。但是，除了上面所列的基本单位以外，还经常采用其他一些单位（厘米、小时、°K）。此外，在工程上还常用公斤同时表示质量和力。

当前，世界各国正广泛的应用国际单位制(SI)，许多国家都已规定采用这种单位制，因为它有很多优点。例如：它统一了力学、电磁学、热力学、光学、声学、化学等领域的计算单位。我国也已规定并正在逐步广泛的应用国际单位制。它是由七个基本单位和两个辅助单位组成(见表1—1)。

表1—1 SI的基本单位和辅助单位

类 别	物 理 量	单 位 名 称	中 文 代 号	国 际 代 号
基 本 单 位	长 度	米	米	m
	质 量	千克(公斤)	千克(公斤)	kg
	时 间	秒	秒	S
	电 流	安 培	安	A
	热力学温度	开尔文	开	K
	物质的量	摩 尔	摩	mol
	光 强 度	坎德拉	坎	cd
辅 助 单 位	平 面 角	弧 度	弧 度	rad
	立 体 角	球面度	球面度	sr

由于国际单位制日益广泛的被应用，这就要求我们工程技术人员必须熟练掌握目前所采用的工程单位与国际单位的关系。这里就在本书涉及范围内，对主要的换算关系作个介绍，有关单位制的详细换算可见本书的附录。

工程单位与国际单位的关系:

1. 温度:

$$1^{\circ}\text{C}(\text{摄氏度}) = 1\text{K}(\text{开尔文}) - 273.15;$$

$$(1\text{K} = 1^{\circ}\text{C} + 273)$$

2. 热量:

$$1\text{千卡(kcal)} = 4186.8\text{焦耳(J)}$$

3. 焓:

$$1\text{千卡(kcal)} = 4186.8\text{焦耳(J)}$$

4. 比热:

$$1\text{千卡}/(\text{公斤}\cdot^{\circ}\text{C}), (\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}) = 4186.8\text{焦耳}/\text{公斤}\cdot\text{K} (\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$$

5. 导热系数:

$$\begin{aligned} 1\text{千卡}/(\text{米}\cdot\text{时}\cdot^{\circ}\text{C}), (\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}) &= 1.16\text{瓦}/\text{米}\cdot\text{K} (\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}) \\ &= 4186.8\text{焦耳}/\text{米}\cdot\text{时}\cdot\text{K} (\text{J}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K}) \\ &= 1.16\text{焦耳}/\text{米}\cdot\text{秒}\cdot\text{K} (\text{J}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}) \end{aligned}$$

6. 传热系数:

$$\begin{aligned} 1\text{千卡}/(\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot^{\circ}\text{C}), (\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}) &= 4186.8\text{焦耳}/\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot\text{K} (\text{J}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K}) \\ &= 1.16\text{瓦}/\text{米}^2\cdot\text{K} (\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}) \end{aligned}$$

7. 力:

$$\begin{aligned} 1\text{公斤力(kgf)} &= 9.80665\text{牛顿(N)} \\ &\simeq 10\text{牛顿(N)} \end{aligned}$$

8. 压力:

$$\begin{aligned} 1\text{工程大气压(at)} &= 1\text{公斤力}/\text{厘米}^2 (\text{kgf}/\text{cm}^2) \\ 1\text{公斤力}/\text{厘米}^2 (\text{kgf}/\text{cm}^2) &= 98067\text{牛顿}/\text{米}^2 (\text{N}/\text{m}^2) \\ &= 0.9807\text{巴(bar)} \\ &= 980.7\text{毫巴(mbar)} \\ 1\text{标准大气压(atm)} &= 101325\text{牛顿}/\text{米}^2 (\text{N}/\text{m}^2) \\ &= 1.013\text{巴(bar)} \\ 1\text{毫米水柱(mmH}_2\text{O)} &= 9.807\text{牛顿}/\text{米}^2 (\text{N}/\text{m}^2) \\ &= 0.0981\text{毫巴(mbar)} \end{aligned}$$

在进行物理量的运算时, 必须注意:

1. 在运用物理量时, 必须同时说明(写出)它的单位和包含单位的数目;
2. 只有相同因次的量, 才能相加、相减或相互比较。因此, 存在于同一个物理方程中, 所有的项应具有相同因次。
3. 必须明确地区分质量与重力的单位, 特别是在引用物质的特性数值时, 注意是基于质量还是基于重量(如密度 ρ 、比热 c 等数值的应用)。

第二章 热力学基础

热工理论基础主要包括两方面：热力学和传热学。热力学的基本内容是研究有关能量，特别是热能的规律和性质；传热学是研究热量在传递过程中的有关规律问题。本章着重介绍热力学的基本概念和热工计算方法，力求概念清楚，方法明确和使用方便。有关传热学基础将在第三章论述。

2—1 热力系统

在热能动力装置中，气体或蒸汽吸收了燃料燃烧所产生的热量后，它们的容积发生膨胀而推动机械做功，并且把余下的热量传递给冷却水或空气，完成了热功转换的过程。通常把气体或蒸汽等用以实现热功转换的工作物质称为工质。把供给工质热量的高温物质称为高温热源，而把吸收工质放热量的冷却介质或环境称为低温热源。

为了分析问题方便起见，和力学中取分离体一样，热力学也常把分析的对象从周围物体分割出来，研究它通过分界面和周围物体之间的热能和机械能的传递。这样被人为地分割出来作为热力学分析的对象叫做热力系统。周围物体统称外界。系统和外界之间的分界面可以是实际存在的，也可以是假想的。例如，当取汽轮机中的工质(蒸汽)作为热力系统时，工质和汽缸之间存在着实际的分界面，而进口前后和出口前后的工质之间却无实际的分界面，此处可以人为地设想一个分界面，把系统中的工质和外界的工质分隔开来。

所取热力系统范围的大小视具体要求而定。例如当需要计算蒸汽动力厂的经济性时，我们可把整个蒸汽动力装置划作一个热力系统，计算它在一段时间内从外界投入的燃料，向外界输出的功，以及冷却水带走的热量等。倘若只研究工质在汽轮机中的工作，我们就把从汽轮机进口到出口之间的蒸汽划作一个热力系统，计算在一段时间内从进口输入的蒸汽所带进的能量，从出口排出的蒸汽所带走的能量，以及蒸汽对叶轮所做的功等。因此，某一个热力系统的划分及其性质的确定，主要看分析问题的需要及方便而定。

2—2 工质的基本状态参数

常用的状态参数有温度、压力、比容(或重度)、内能、焓、熵等六个参数。其中温度、压力、比容可以直接或间接地用仪器测量出来，而其余三个参数则是由这几个参数导出的。因此，温度、压力、比容称为基本状态参数；内能、焓、熵称为导出状态参数。本节仅介绍基本状态参数的物理意义及其表示方法，导出状态参数将在第六节中介绍。

一、比容

单位重量的物质所占有的容积称为比容，其符号用 v 表示，其单位为 m^3/kg 。按定义可得

$$v = \frac{V}{G} \quad (2-1)$$

式中 G ——物质的重量 kg ;
 V ——物质的容积 m^3 。

单位容积物质的重量称为重度, 其符号用 γ 表示, 其单位为 kg/m^3 。按定义可得

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{1}{v} \quad (2-2)$$

即重度的数值就是比容数值的倒数。

二、压力

气体的压力就是气体在单位面积容器壁上的垂直作用力。气体压力也称为绝对压力, 用符号 P_{jd} 表示。测量压力的仪表并不是直接测得气体的绝对压力, 而是测得绝对压力和当时的大气压力的差值。当气体的绝对压力高于大气压力时, 压力表指示的数值称为表压力, 用 P_b 表示, 则可以得到

$$P_{jd} = B + P_b \quad (2-3)$$

式中 B ——根据气压表测得的大气压力。

当气体的压力低于大气压时, 用真空表测得的数值, 即绝对压力低于大气压力的数值, 称为真空度, 用 P_{zk} 表示, 则可得

$$P_{jd} = B - P_{zk} \quad (2-4)$$

显然大气压力是经常变化的, 所以即使绝对压力不变时, 随着大气压力变化, 表压力或真空度也要发生变化。因而作为气体状态参数的压力, 只能是气体的绝对压力。

一般测量较小的压力常采用U形管压力表。当U形管两边直管中液柱高度差为 Δh 时, 表压力可按下式计算:

$$P_b = \gamma \Delta h$$

式中 γ ——液体的重度。

压力的单位为帕斯卡, 国际代号为 Pa 。此外, 暂时尚可并用的其他一些压力单位, 它们的名称、代号等见表2-1。

表2-1 暂时与国际单位制压力单位并用的单位

单位名称	单位代号		与帕间的换算关系	备 注
	中 文	国 际		
巴	巴	bar	$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$	
标准大气压	标准大气压	atm	$1\text{atm} = 101325\text{Pa}$	
托 (毫米汞柱)	托 (毫米汞柱)		$1\text{Torr} = 1\text{mm} \cdot \text{Hg}$ $= 133.32\text{Pa}$	Torr及 $\text{mm} \cdot \text{Hg}$ 均为 习惯上常用的符号
工程大气压 (公斤力每平方厘米)	工程大气压 (公斤力/厘米 ²)	at (kgf/cm^2)	$1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2$ $= 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$	
毫米水柱	毫米水柱		$1\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$	$\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为习惯上 常用的符号

它们相互间的换算关系如下:

$$1 \text{at} = 1 \text{kgf/cm}^2 = 10000 \text{kgf/m}^2 = 10000 \text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O} = 735.6 \text{mm} \cdot \text{Hg}(0^\circ\text{C}) \\ = 0.968 \text{atm} = 0.9806 \text{bar} = 9.8066 \times 10^4 \text{Pa}$$

在表示大气压力时,经常采用标准大气压为单位。标准大气压也称为物理大气压。大气压力也常用毫米汞柱 $\text{mm} \cdot \text{Hg}$ 表示。其换算关系为

$$1 \text{atm} = 760 \text{mm} \cdot \text{Hg}(0^\circ\text{C}) = 1.0332 \text{kgf/cm}^2 = 101325 \text{Pa}$$

三、温度

温度是标志物体冷热程度的参数。用分子运动学说可以揭示物体冷热程度的本质。

物体的温度用测温仪表测定。为了标志温度的高低和保证温度测量的准确一致,就要规定一个衡量温度高低的标准尺度,称为温度标尺,简称温标。目前国际上通用的温标主要有两种,其名称、符号和单位见表2—2。

表2—2 温 标

温 标 名 称	符 号	单 位 及 符 号
摄 氏 温 度 (或百度温标)	t	摄氏度 $^\circ\text{C}$
绝对温度 (或开尔文温标)	T	开尔文K

摄氏温度和绝对温度之间的换算关系为

$$T = 273 + t \quad (2-5)$$

此外,英、美等国家还习惯采用华氏温度,仍用符号 t 表示,单位是 $^\circ\text{F}$,在标准大气压下,纯水的冰点和沸点分别为 32°F 和 212°F 。华氏温度与摄氏温度之间的换算关系为

$$t^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (t^\circ\text{F} - 32) \quad (2-6)$$

2—3 气体的状态方程

既然温度、压力、比容这三个基本状态参数从不同的方面表达了气体的状态,那么它们之间必然存在着一定的内在联系。这种联系可以用函数式表示为

$$T = f(P, v)$$

$$P = f(T, v)$$

$$v = f(P, T)$$

由此可知,对于一个确定的状态,三个基本状态参数之间的关系可表示为

$$F(P, v, T) = 0$$

称为气体的状态方程,或称特性方程。

一、理想气体状态方程式

理想气体是一种实际上不存在的假想气体,假定它的分子是弹性的、不占据体积的质

点, 分子相互之间没有作用力。这就说明理想气体仅是一种理想的模型。但实验证明, 当压力较低或温度较高时, 一般气体的比容较大, 因此, 其分子间的作用力及分子本身体积就可忽略, 它的性质就比较接近理想气体。基于这种情况, 在对各种气体进行了大量实验的基础上, 总结得到了理想气体状态方程式。

对于 1kg 气体的状态方程式为

$$Pv = RT \quad (2-7)$$

式中 P ——气体的绝对压力 kg/m^2 ;

v ——气体的比容 m^3/kg ;

T ——气体的绝对温度 K ;

R ——气体常数, 它取决于气体的性质, 不同的气体 R 值不同, 而与气体所处的状态无关。

将公式(2-7)等号两边同时乘上气体的总重量 G , 便可得到 $G \text{ kg}$ 气体的状态方程式

$$PvG = GRT$$

而 $V = vG$

所以 $PV = GRT \quad (2-8)$

气体还常采用一种特殊重量单位——摩尔, 它给工程上进行气体的一些计算带来了很大的方便。

$$1 \text{ 摩尔}(\text{mol}) = \mu \text{ kg}$$

μ 是气体的分子量。1 mol 表示在数量上等于气体的分子量, 而单位用公斤表示的重量, 也称 1 公斤分子。例如, 氧(O_2)的分子量为 32, 则 32kg 的 O_2 便是 1 mol。

将公式(2-7)两边同时乘上 μ 便可得到 1 mol 气体的状态方程式

$$Pv\mu = \mu RT \quad (2-9)$$

式中 μv ——称为气体的摩尔容积 m^3/mol 。

实验证明, 各种不同的气体, 在同样的温度和压力下, 其摩尔容积均相等。在标准状态下, 各种气体的 1 摩尔容积都等于 22.4 m^3 , 或写成 22.4 标准立方米 (Nm^3)。以上实验得到的结论称为阿佛加德罗定律, 它仅适用于理想气体。

现将标准状态下压力、温度及其摩尔容积代入公式(2-9)可得

$$\begin{aligned} \mu R &= \frac{P_0 \cdot \mu v_0}{T_0} \\ &= \frac{10332 \times 22.4}{273} \\ &= 848 \text{ kgm/mol} \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (2-10)$$

由此得出结论: 对于各种气体, μR 值都等于 $848 \text{ kgm/mol} \cdot \text{K}$, 它与气体的性质和状态无关, 故称 μR 为通用气体常数。由公式(2-10)可求出各种气体的气体常数 R 值, 即

$$R = \frac{848}{\mu} \text{ kg} \cdot \text{m/kg} \cdot \text{K} \quad (2-11)$$

表2—3 几种气体的气体常数

气 体 名 称	符 号	分 子 量	气 体 常 数 R
氧	O ₂	32	26.5
氮	N ₂	28	30.26
二 氧 化 碳	CO ₂	44	19.28
水 蒸 汽	H ₂ O	18	47.1
空 气		28.9	29.3

二、理想气体状态方程的实际应用

理想气体状态方程式，在应用中是有一定的条件和范围的，它只适用于可以当作理想气体看待的气体。但是，理想气体并不是凭空假想出来的，它是在实践经验的基础上，对于实际存在的气体在一定条件下($v \rightarrow \infty$, $P \rightarrow 0$ 时)的科学抽象。实践证明，如空气、烟气、氧、氮等气体，在通常情况下都很接近理想气体，在工程上把它们当作理想气体看待是完全可以的。

气体的压力增高，温度降低，比容减小，以致达到气体分子本身的体积及分子间的作用力均不能忽略不计时， P 、 v 、 T 之间的关系就不再符合理想气体状态方程式。因此，就不能当作理想气体看待，这样的气体称为实际气体。刚刚脱离液态的气体，如锅炉中产生的水蒸汽，其比容较小，分子间的作用力及分子本身体积均不能忽略，属于实际气体。如果继续对蒸汽加热，提高其温度，则温度越高，比容越大，就越接近于理想气体。在某种压力、温度条件下，气体是否可以当作理想气体，这要看把这种气体当作理想气体来分析计算时，所引起的误差是否在工程要求所允许的范围内而定。

理想气体状态方程式在热工计算中有广泛的应用。现就以工程中常用的计算内容举例如下：

1. 根据理想气体状态方程可知，对于一定量的某种气体， P 、 V 、 T 三个状态参数中只有两个是独立的，如果已知其中任意两个参数，第三个参数即可由状态方程式计算确定。

例2—1 求空气在标准状态下的比容和重度。

解：标准状态 $P_0 = 10332 \text{ kg/m}^2$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

空气的气体常数 $R = 29.3 \text{ kg} \cdot \text{m/kg} \cdot \text{K}$

按公式(2—7) $Pv = RT$

$$\begin{aligned} \text{空气的比容} \quad v_0 &= \frac{RT_0}{P_0} = \frac{29.3 \times 273}{10332} \\ &= 0.774 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{空气的重度} \quad \gamma_0 &= \frac{1}{v_0} = \frac{1}{0.774} \\ &= 1.293 \text{ kg/Nm}^3 \end{aligned}$$